

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2123-04

邓肯-张本构模型在 $FLAC^{3D}$ 中的开发与实现

陈育民, 刘汉龙

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘要: 根据 $FLAC^{3D}$ 软件提供的二次开发平台, 利用 VC++ 环境在 $FLAC^{3D}$ 软件中实现了邓肯-张本构模型的开发, 设计了一系列三轴试验的模拟算例对模型开发的正确性进行了验证。给出了在 $FLAC^{3D}$ 中开发本构模型的基本步骤和编程要点, 为其他用户进行本构模型的修改提供了借鉴和参考。由于 $FLAC^{3D}$ 开发环境的特点, 用户编写的本构模型和软件自带的本构模型的执行效率处在同一水平。

关键词: 邓肯-张模型; $FLAC^{3D}$; 二次开发

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in $FLAC^{3D}$

CHEN Yu-min, LIU Han-long

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the further developing platform, the Duncan-Chang constitutive model is developed in $FLAC^{3D}$ with VC++ environment. A series of numerical simulations of triaxial tests are performed to verify the correctness of the compiled model. The provided basic procedures and programming essentials of the constitutive model redefining in $FLAC^{3D}$ offer a reference for other developers. Because of the characteristic of the development environment, a user-defined model has the same execution efficiency with the in-built model in $FLAC^{3D}$.

Key words: Duncan-Chang constitutive model; $FLAC^{3D}$; further development

1 引言

1986年, 美国 ITASCA 咨询集团公司研制开发了 $FLAC$ (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 程序, 它基于连续介质显示拉格朗日差分法, 适合求解非线性的大变形问题, $FLAC^{3D}$ 是其三维有限差分程序。在国外, $FLAC/FLAC^{3D}$ 软件在众多行业中得到了较大的应用^[1], 如工程地质学、构造地质学、大陆动力学、成矿学等。上世纪 90 年代初, 该软件被引入中国, 主要应用于岩土力学分析, 例如矿体滑坡、煤矿开采沉陷预测、水利枢纽岩体稳定性分析、采矿巷道稳定性研究等。目前 $FLAC/FLAC^{3D}$ 软件已广泛应用于岩土工程、采矿工程、水利工程、地质工程等行业与部门。

$FLAC^{3D}$ 本身带有较多的本构模型, 比如 1 个开挖模型, 3 个弹性模型 (各向同性, 横观各向同

性、正交各向同性弹性模型) 及 6 个塑性模型 (DP 模型、摩尔-库仑模型、应变硬化/软化模型、遍布节理模型、双线性应变硬化/软化遍布节理模型和修正的剑桥模型)。但国内岩土工程领域中广泛采用的邓肯-张本构模型并没有在 $FLAC^{3D}$ 中得以实现, 这使得 $FLAC^{3D}$ 在国内岩土工程数值分析中的应用受到了局限。为了弥补这一不足, 本文利用 $FLAC^{3D}$ 提供的二次开发平台, 成功实现了邓肯-张本构模型在 $FLAC^{3D}$ 软件中的开发, 并设计了一系列典型算例对模型的正确性进行了验证。

2 $FLAC^{3D}$ 计算步骤及二次开发环境

2.1 计算步骤

$FLAC^{3D}$ 采用混合离散技术, 将整个分析区域离散为可由四面体单元组合形成的五面体或六面体等单元, 在显式时间差分求解中, 所有的矢量参数

(力、速度和位移)都储存在网格节点上,所有的标量及张量(应力及材料特性)储存在单元的中心位置。通过运动方程由应力及外力可以求出节点的速度及位移,再由空间导数得出单元应变率,借助于材料的本构关系,由单元应变率可以获得新的单元应力。显示拉格朗日计算循环如图 1 所示^[2]。

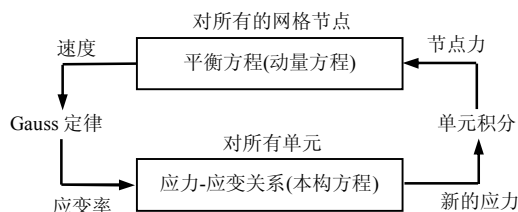


图 1 FLAC^{3D} 的计算循环图
Fig.1 Calculating diagram of FLAC^{3D}

2.2 二次开发环境

FLAC^{3D} 采用面向对象的语言标准 C++编写而成,其所有的本构模型都是以动态链接库文件(.DLL 文件)的形式提供给用户,在计算过程中主程序会自动调用用户指定的本构模型的动态链接库文件。对于用户自定义的本构模型而言,这个.DLL 文件需要在 VC++6.0 (SP4) 或更高版本的开发环境中进行编译,然后由主程序调用执行^[3]。

FLAC^{3D} 自定义本构模型的主要功能是对给出的应变增量得到新的应力,辅助功能包括提供模型名称、版本等基本信息及完成读写等基本操作。模型文件的编写主要包括 5 部分的内容:①基类(class Constitutive Model)的描述;②成员函数的描述;③模型的注册;④模型与 FLAC^{3D} 之间的信息交换;⑤模型状态指示器的描述。由于 FLAC^{3D} 自带的本构模型和用户自己编写的本构模型继承的都是同一个基类,因此用户自定义的本构模型和软件自带的本构模型的执行效率处在同一水平。

3 邓肯-张模型的数学表达式

根据定义在 stensor.h 文件中的应力张量结构体可以得到当前单元应力场的 3 个主应力大小及方向,且输出的 3 个主应力大小是按照弹塑性理论的应力符号约定的。为了统一标准,在编程过程中仍然采用了弹塑性理论的应力符号约定。因此,土力学中大主应力应为输出的 $-\sigma_3$, 中主应力为 $-\sigma_2$, 小主应力为 $-\sigma_1$ 。以邓肯-张 E-B 模型^[4]为例,切线弹性模量的表达式为

$$E_t = (1 - R_t s)^2 k p_a \left(\frac{-\sigma_1}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

式中: R_t 为破坏比; s 为应力水平; k , n 为试验得到的参数;

体积模量的表达式为

$$K_t = k_b p_a \left(\frac{-\sigma_1}{p_a} \right)^m \quad (2)$$

式(1)中应力水平的表达式为

$$s = \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi - 2\sigma_1 \sin \varphi} \quad (3)$$

由于材料的泊松比只能在 0~0.49 之间变化,因此式(2)得到的 K_t 需要进行限制,在程序中限制在 (0.33~17) E_t 之间。

对于卸载情况,回弹模量的表达式为

$$E_{ur} = k_{ur} p_a \left(\frac{-\sigma_1}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

同时,为了考虑颗粒体材料的抗剪强度随围压增大而降低,内摩擦角改用下式计算:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \log \left(\frac{-\sigma_1}{p_a} \right) \quad (5)$$

以反映颗粒材料压碎对内摩擦角降低的影响。计算中,如果输入参数 $\Delta \varphi = 0$, 则不考虑内摩擦角降低的影响。

至此,由式(1)~(5)可以确定邓肯-张 E-B 增量本构方程,其表达式为

$$\Delta \sigma_{ij} = 2G_t \Delta \varepsilon_{ij} + \alpha \Delta \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (6)$$

其中

$$G_t = \frac{3K_t E_t}{9K_t - E_t} \quad (7)$$

$$\alpha = K_t - \frac{2}{3} G_t \quad (8)$$

4 程序流程与编程概要

4.1 邓肯-张模型开发的程序流程

根据式(1)~(8),图 2 给出了 FLAC^{3D} 中开发邓肯-张本构模型的程序流程。可以看出,程序主体是重载 DuncanChang 类的 Initialize() 和 Run() 两个成员函数。

4.2 FLAC^{3D} 本构模型开发的编程概要

FLAC^{3D} 的二次开发环境提供了开放的用户接口,软件提供了自带所有本构模型的源代码,可以方便地进行本构模型的修改与开发。本文根据邓肯-张模型的开发经验,对 FLAC^{3D} 用户接口的关键函

数及自定义本构模型的编程要点进行了总结。为了叙述方便, 下面以建立模型名称为 UserModel 为例进行说明。

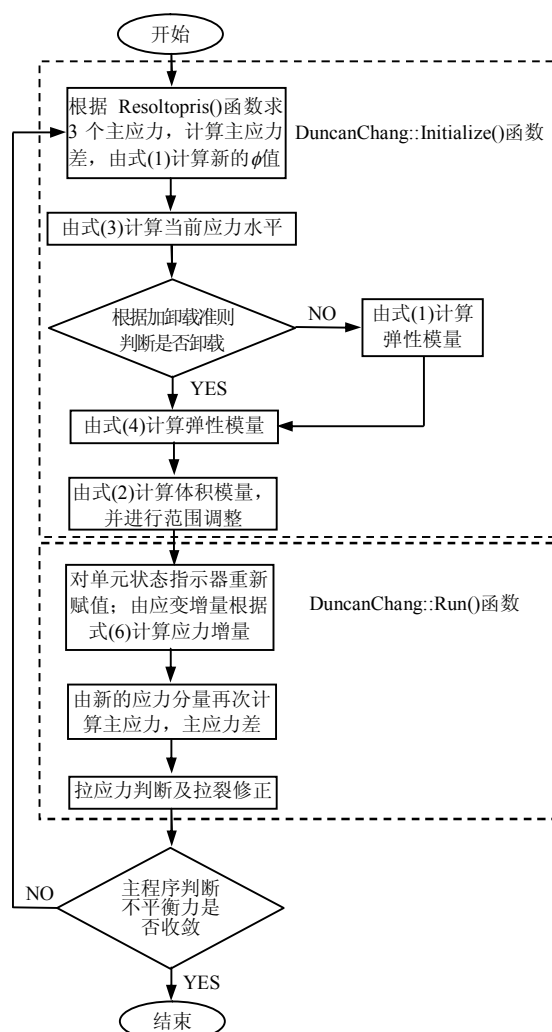


图 2 邓肯-张模型程序流程图

Fig.2 Program flowchart of Duncan-Chang model

FLAC^{3D} 的本构模型开发工作主要是修改头文件 (.H 文件) 和程序文件 (.CPP 文件)。在头文件中进行新的本构模型派生类的声明, 修改模型的 ID、名称和版本, 修改派生类的私有成员, 包括模型的基本参数及程序执行过程中主要的中间变量。在程序文件中需要进行的修改有以下几个方面:

(1) 修改模型结构 (UserModel::UserModel(bool bRegister): Constitutive Model) 的定义, 这是一个空函数, 主要功能是给头文件中定义的所有私有成员赋初值, 一般均赋值为 0.0。

(2) 修改 UserModel::Properties() 函数, 该函数包含了给定模型参数的名称字符串, 在 FLAC^{3D} 的计算命令中需要用到这些字符串进行模型参数赋值。

(3) UserModel::States() 函数是单元在计算过程中的状态指示器, 可以根据需要修改指示器的内容。

(4) 按照派生类中定义的模型参数变量修改 UserModel::GetProperty() 和 UserModel::SetProperty() 函数, 这两个函数共同完成模型参数的赋值功能。

(5) UserModel::Initialize() 函数在执行 CYCLE 命令或大应变模式下对于每个模型单元 (zone) 调用一次, 主要执行参数和状态指示器的初始化, 并对派生类声明中定义的私有变量进行赋值。

(6) UserModel::Run() 是整个模型编制过程中最主要的函数, 它对每一个子单元 (sub-zone) 在每次循环时均进行调用, 由应变增量计算得到应力增量, 从而获得新的应力。在计算过程中, 要根据单元应力情况对单元状态指示器进行修改。当进行塑性模型编制时, 需对达到塑性的应力状态进行修正。

(7) 修改 UserModel::SaveRestore() 中的变量, 修改方法同 (1) 和 (4), 该函数的主要功能是对计算结果进行保存。

(8) 程序的调试有两种方法。①在 VC++ 的工程设置中将 FLAC^{3D} 软件中的 EXE 文件路径加入到程序的调试范围中, 并将 FLAC^{3D} 自带的 DLL 文件加入到附加动态链接库 (Additional DLLs) 中, 然后在程序文件中设置断点, 进行调试; ②在程序文件中加入 return() 语句, 这样可以将希望得到的变量值以错误提示的形式在 FLAC^{3D} 窗口中得到。

5 算例验证

为了对开发好的邓肯-张本构模型进行测试, 本文采用三轴试验的数值模拟来验证开发模型的正确性。邓肯-张 E-B 模型参数见表 1 所示。

表 1 邓肯-张 E-B 模型参数
Table 1 Parameters of Duncan-Chang E-B model

参数	数值	参数	数值	参数	数值
c / kPa	110	R_f	0.79	K_b	303
$\varphi_0 / (^{\circ})$	48.5	k	704	m	0.18
$\Delta\varphi / (^{\circ})$	0.0	n	0.38	K_{ar}	844.8

5.1 三轴试验模拟

计算模型的尺寸采用大型三轴仪的试样大小, 同时为了简化边界条件, 采用 1 个边长为 600 mm 的立方体 brick 单元, 单元底面为竖向位移约束, 周围的 4 个面采用应力边界条件, 模型顶部荷载使用 FISH 函数分级施加, 每级 10 kPa, 计算收敛的最大不平衡力比为默认的 10^{-5} , 力学模型采用本文开发的邓肯-张模型。计算中分别采用了 3 种不同的

围压条件 (300, 600 和 900 kPa), 计算结果主要分析偏应力-轴向应变关系及体积应变-轴向应变的关系, 并与邓肯-张的理论值进行对比以分析计算结果的正确性。

对比结果见图 3 和图 4。从两图中可以看出, $FLAC^{3D}$ 的计算结果同邓肯-张理论值十分吻合, 表明在 $FLAC^{3D}$ 中开发实现邓肯-张模型的计算结果是正确的。

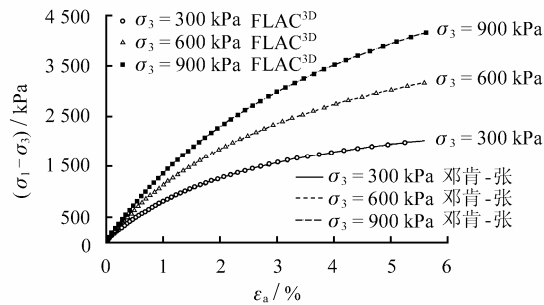


图 3 不同围压下偏应力与轴向应变曲线

Fig.3 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ at different confining pressures

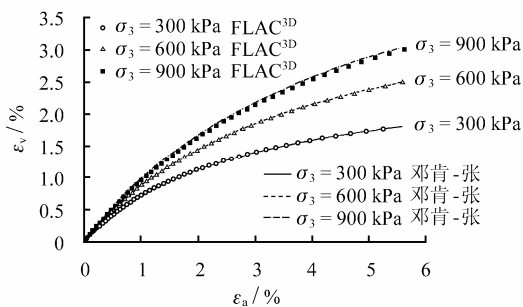


图 4 不同围压下体积应变与轴向应变曲线

Fig.4 Curves of $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ at different confining pressures

5.2 应力路径试验模拟

利用上节中的计算模型, 分别考虑了两种围压 (600 和 900 kPa) 下的加卸载过程来测试 $FLAC^{3D}$ 开发的邓肯-张模型对应力路径的适应性。两种围压下的加卸载循环过程如表 2 所示。

表 2 应力路径试验的偏应力历史(单位: kPa)
Table 2 Deviator stress history of stress path test

围压 /kPa	初始	加载 1	卸载 1	加载 2	卸载 2	加载 3	卸载 3	加载 4
600	0	100	50	200	50	300	50	320
900	0	200	50	300	50	400	50	430

$FLAC^{3D}$ 计算结果同邓肯-张的理论值对比见图 5 所示, 可以发现在加载和卸载的过程中计算结果

都同理论值十分吻合, 这进一步证明了模型开发的正确性。

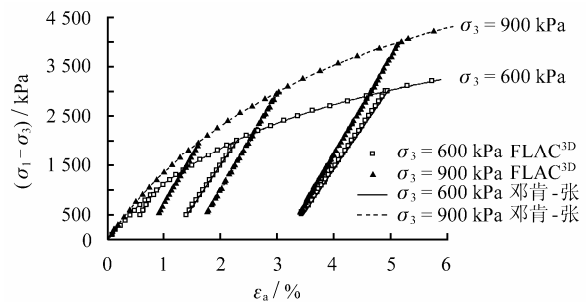


图 5 加卸载条件下偏应力与轴向应变关系

Fig.5 Curves of load history and axial strain

6 结 论

根据 $FLAC^{3D}$ 软件提供的二次开发平台, 成功实现了邓肯-张本构模型的开发。为了验证模型开发的正确性, 本文设计了一系列常规三轴试验和应力路径三轴试验的数值模拟计算。结果表明, 模型的计算结果同理论值十分吻合。

另外, 根据邓肯-张本构模型开发的经验, 文中详细总结了在 $FLAC^{3D}$ 中进行自定义本构模型的基本步骤和编程要点, 为其他用户进行本构模型的修改与开发提供了借鉴和参考。

参 考 文 献

- [1] 龚纪文, 席先武, 王岳军, 等. 应力与变形的数值模型方法——数值模拟软件 FLAC 介绍[J]. 华东地质学院学报, 2002, 25(3): 220—227.
GONG Ji-wen, XI Xian-wu, WANG Yue-jun, et al. Numerical model method of stress and strain ——Introduction to numerical model software FLAC[J]. Journal of East China Geological Institute, 2002, 25(3): 220—227.
- [2] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [3] Itasca Consulting Group. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. MN, USA: Itasca Consulting Group, Minneapolis, 2002.
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.